

# (19) 대한민국특허청 (KR) (12) 공개특허공보 (A)

(51) 。 Int. Cl. <sup>7</sup>  
H01L 29/772

(11) 공개번호 특2003-0024156  
(43) 공개일자 2003년03월26일

(21) 출원번호 10 - 2001 - 0057176  
(22) 출원일자 2001년09월17일

(71) 출원인 한국전자통신연구원  
대전 유성구 가정동 161번지  
(72) 발명자 김현탁  
대전광역시유성구전민동엑스포아파트206동1505호  
강광용  
대전광역시유성구신성동한울아파트110동802호  
(74) 대리인 이영필  
이해영

심사청구 : 있음

## (54) 급격한 금속 - 절연체 상전이를 이용한 전계 효과 트랜지스터

### 요약

본 발명의 전계 효과 트랜지스터는, 기판과, 기판 상에 배치되어 충전 홀이 유입시 급격한 금속 - 절연체 상전이를 발생시키는 모트 절연체와, 모트 절연체 위에 배치되어 일정 전압 인가시 충전 홀을 모트 절연체에 유입시키는 강유전체막과, 강유전체막 위에 배치되어 강유전체막에 일정 전압을 인가하기 위한 게이트 전극과, 모트 절연체의 제1 표면과 전기적으로 연결되도록 형성된 소스 전극, 및 모트 절연체의 제2 표면과 전기적으로 연결되도록 형성된 드레인 전극을 구비한다.

### 대표도

도 4

색인어

전계 효과 트랜지스터, 모트 트랜지스터, 금속 절연체 상전이

명세서

도면의 간단한 설명

도 1a 및 도 1b는 일정 조건하에서 급격한 금속 - 절연체 상전이 현상을 나타내는 모트 절연체 내부의 원자 배치를 나타내 보인 다이어그램이다.

도 2는  $\text{LaTiO}_3$  (LTO) 모트 절연체의 전도띠 채우기 인자값에 따른 이동자의 유효 질량을 나타내 보인 그래프이다.

도 3은  $\text{LaTiO}_3$  (LTO) 모트 절연체의 전도띠 채우기 인자값에 따른 전기 전도도( $\sigma$ )를 나타내 보인 그래프이다.

도 4는 본 발명에 따른 전계 효과 트랜지스터를 나타내 보인 단면도이다.

#### < 도면의 주요 부분에 대한 부호의 설명 >

400... $\text{SrTiO}_3$  (STO) 기판 410... $\text{LaTiO}_3$  (LTO) 모트 절연체

415...도전 채널 420... $\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3$  (BSTO) 강유전체막

430...게이트 전극 440...소스 전극

450...드레인 전극

#### 발명의 상세한 설명

##### 발명의 목적

발명이 속하는 기술 및 그 분야의 종래기술

본 발명은 전계 효과 트랜지스터에 관한 것으로서, 보다 상세하게는 급격한 금속 - 절연체 상전이를 이용한 전계 효과 트랜지스터에 관한 것이다.

현재 초소형 및 초고속용 스위칭 트랜지스터로서 모스 전계 효과 트랜지스터(MOSFET; Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)가 주로 사용되고 있다. MOSFET는 낮은 드레인 전압에서 선형적 특성을 나타내는 2개의 pn 접합 구조를 기본 구조로 채용하고 있다. 그러나 소자의 집적도 증가에 따라 채널 길이를 대략 50nm 이하로 감소시키는 경우 디플리션층의 증가로 캐리어(carrier)의 농도가 변화하고, 게이트와 채널 사이를 관통하여 흐르는 전류가 크게 증가하게 된다.

최근 이와 같은 문제를 해결하기 위한 수단으로서 허바드의 연속적 금속 - 절연체 상전이(Mott - Hubbard metal - Insulator transition), 즉 2차 상전이를 하는 모트 - 허바드(Mott - Hubbard) 절연체를 채널층에 사용하는 모트 전계 효과 트랜지스터에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 모트 전계 효과 트랜지스터는 금속 - 절연체 상전이에 따라 온/오프 동작을 수행하며, 모스 전계 효과 트랜지스터와 달리 디플리션층이 존재하지 않으므로 소자의 집적도를 크게 향상시킬 수 있을 뿐만 아니라, 모스 전계 효과 트랜지스터보다 고속의 스위칭 특성을 나타내는 것으로 알려져 있다.

모트 - 허바드 전계 효과 트랜지스터는, 연속적으로 발생하는 금속 - 절연체 상전이를 이용하므로, 금속적 특성을 가장 잘 나타낼 때까지 연속적으로 운반자로 이용될 전하를 첨가하여야 한다. 따라서 첨가하는 전하가 고농도이어야 한다. 일반적으로 단위 면적당 충전 전하량(N)은 아래의 수학적 식 1과 같이 나타낼 수 있다.

수학식 1

$$N = \frac{e}{cd} V_g$$

여기서  $\epsilon$  은 게이트 절연체의 유전율,  $e$ 는 기본 전하,  $d$ 는 게이트 절연체의 두께, 그리고  $V_g$ 는 게이트 전압을 각각 나타낸다.

모트-허바드 절연체로 분류되는 물질들 중의 하나인  $\text{La}_2\text{CuO}_4$ 의 경우를 예를 들면,  $\text{La}_2\text{CuO}_4$ 에 홀(hole)을 첨가하면  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  (LSCO)의 특성이 나타나고,  $x=0.15$ (15%)에서 최고의 홀 운반자를 갖는 금속이 된다. 여기서 홀을 첨가하면 첨가한 것이 운반자가 된다. 통상적으로  $x=0.15$ 는 고농도이므로,  $N$ 값이 크게 되면, 게이트 절연체의 유전율이 크거나, 절연체의 두께가 얇거나, 또는 게이트 전압이 커져야 한다. 그러나 유전율이 너무 커지면, 고속 스위칭 동작에서 유전체의 피로 특성이 급격하게 나빠져서 트랜지스터의 수명이 단축된다. 그리고 절연체의 두께를 얇게 하는 데는 공정상의 한계로 인하여 어려운 점이 있다. 또한 게이트 전압이 커지는 경우 전력 소모가 증가하여 저전력용으로 사용하기가 어렵다는 문제가 있다.

발명이 이루고자 하는 기술적 과제

본 발명이 이루고자 하는 기술적 과제는 저농도의 홀을 첨가하더라도 금속적 특성을 잘 나타낼 수 있도록 급격한 금속-절연체 상전이를 이용한 전계 효과 트랜지스터를 제공하는 것이다.

발명의 구성 및 작용

상기 기술적 과제를 달성하기 위하여, 본 발명에 따른 전계 효과 트랜지스터는, 기판; 상기 기판 상에 배치되어 충전 홀이 유입시 급격한 금속-절연체 상전이를 발생시키는 모트 절연체; 상기 모트 절연체 위에 배치되어 일정 전압 인가시 상기 충전 홀을 상기 모트 절연체에 유입시키는 강유전체막; 상기 강유전체막 위에 배치되어 상기 강유전체막에 일정 전압을 인가하기 위한 게이트 전극; 상기 모트 절연체의 제1 표면과 전기적으로 연결되도록 형성된 소스 전극; 및 상기 모트 절연체의 제2 표면과 전기적으로 연결되도록 형성된 드레인 전극을 구비하는 것을 특징으로 한다.

상기 기판은  $\text{SrTiO}_3$  기판인 것이 바람직하다.

상기 모트 절연체는,  $\text{LaTiO}_3$ ,  $\text{VO}_2$ ,  $\text{YTiO}_3$  또는  $h\text{-BaTiO}_3$  물질로 이루어진 것이 바람직하다.

상기 강유전체막은  $\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3$  물질로 이루어진 것이 바람직하다.

상기 소스 전극과 상기 드레인 전극은 상기 강유전체막에 의해 상호 분리되는 것이 바람직하다.

이하 첨부 도면을 참조하여 본 발명의 바람직한 실시예를 상세히 설명하기로 한다. 그러나, 본 발명의 실시예들은 여러 가지 다른 형태로 변형될 수 있으며, 본 발명의 범위가 아래에서 상술하는 실시예들로 인해 한정되어지는 것으로 해석되어서는 안된다.

먼저 본 발명에 따른 전계 효과 트랜지스터의 동작 원리를 설명하기로 한다.

도 1a 및 도 1b는 일정 조건하에서 급격한 금속-절연체 상전이 현상을 나타내는 모트 절연체 내부의 원자 배치를 나타내 보인 다이어그램이다.

먼저 도 1a에 도시된 바와 같이, 어떤 원자에 2개의 전자들이 존재하고, 그 전자들 사이에 작용하는 반발 쿨롱 상호 작용(repulsive Coulomb interaction)의 세기(U)가 전자와 전자 사이의 최대 쿨롱 에너지( $U_c$ )와 같게 되면, 즉  $U/U_c = k=1$ 이 되면, 그 원자에 2개의 전자가 존재하지 못하고 그 중 하나의 전자는 이웃 원자로 이동해가면서 속박된다. 이와 같이 속박되고 금속적인 전자 구조를 갖는 절연체를 모트 절연체(100)라 일컫는다.

이와 같은 모트 절연체(100)에 매우 적은 농도의 홀을 첨가하면, 모트 절연체(100)는 쿨롱 상호 작용이 약해져서 급격히 금속으로 상전이 되어 금속상과 절연상을 함께 갖는 불균일 금속적 시스템으로 변경된다. 이와 같이 급격한 상전이 현상은 "Hyun - Tak Kim, Physica C 341 - 348, 259(2000)"에 잘 나타나 있다. 여기서 불균일 금속적 시스템이 되는 이유는 홀의 첨가로 인하여 전자들의 수가 원자들의 수보다 적어지기 때문이다.

이 경우, 도 1b에 도시된 바와 같이, 쿨롱 상호 작용의 세기(U)가 최대 쿨롱 에너지( $U_c$ )보다 작게 되고, 즉  $U/U_c = k < 1$ 이 되고, 이에 따라 지역적이지만 브링크만 - 라이스(Brinkman - Rice)의 강상관(strong correlation) 금속 이론을 따르는 강상관 금속(도 1b의 M으로 표시)이 된다. 브링크만 - 라이스의 강상관 금속 이론은 "W. F. Brinkman, T. M. Rice, Phys. Rev. B2, 4302 (1970)"에 잘 나타나 있다. 이와 같은 강상관 금속은 한 개의 원자에 한 개의 전자를 갖는 전자 구조, 즉 다시 말해서 s 에너지 띠(energy band)에 1개의 전자가 채워진 금속적 전자 구조와 전자의 운반자를 갖는다. 이와 같은 현상을 이론적으로 보다 상세하게 설명하면 다음과 같다.

도 1b의 금속 영역(M)에서, 운반자의 유효 질량( $m^*/m$ )은 아래의 수학적 식 2로 정의된다.

수학적 식 2

$$\frac{m^*}{m} = \frac{1}{1-k^2}$$

이 경우,  $k < 1$ 을 만족하며,  $k=1$  근처의 어떤 값과  $k=1$  사이에서 급격한 금속 - 절연체 상전이가 일어나며, 이와 같은 이론 식은 "W. F. Brinkman, T. M. Rice, Phys. Rev. B2, 4302 (1970)"에서 나타나고, 강상관에 관한 최초의 이론은 "N. F. Mott, Metal - Insulator Transition, Chapter 3, (Taylor & Frances, 2nd edition, 1990)"에서 주어져 있다.

한편 도 1b의 전체 금속적 시스템에서 관측되는 운반자의 유효 질량( $m^*/m$ )은 아래의 수학적 식 3으로 나타낼 수 있다.

수학적 식 3

$$\frac{m^*}{m} = \frac{1}{1-k^2 p^2}$$

여기서,  $p$ 는 전도띠 채우기 인자(band filling factor)로서, 원자들의 개수에 대한 전자들(또는 캐리어들)의 개수의 비율로 나타낼 수 있다. 이 경우  $k=1$ 일 때,  $p=1$  근처의 어떤 값에서  $p=1$ 로 급격한 전이가 일어나며, 이와 같은 이론은 앞서 인용한 "Hyun - Tak Kim, Physica C 341 - 348, 259(2000)"에 잘 나타나 있다.

물질  $Sr_{1-x}La_xTiO_3$  (SLTO)의 경우를 예를 들면,  $SrTiO_3$  (STO) 모트 절연체의  $Sr^{+2}$  자리에  $La^{+3}$ 을 치환하는 것은 전자를 도핑하는 경우이고, 반대로  $LaTiO_3$  (LTO) 모트 절연체의  $La^{+3}$  자리에  $Sr^{+2}$ 를 치환하는 것은 홀을 도핑하는 경우이다.

도 2는  $LaTiO_3$  (LTO) 모트 절연체에 첨가되는  $Sr^{+2}$  홀의 비율, 즉 전도띠 채우기 인자값( $p$ )에 따른 유효 질량( $m^*/m$ )을 나타내 보인 그래프이다.

도 2에 도시된 바와 같이,  $k=1$ 인 경우,  $p=1$ 에서부터  $p=0.95$ 에 이르기까지, 즉  $\text{LaTiO}_3$  (LTO) 모트 절연체에  $\text{Sr}^{+2}$  5%의 홀이 첨가되기까지, 운반자의 유효 질량이 가장 큰 금속에서 급격하게 모트 절연체로 상전이(그래프에서 화살표로 표시)하는 것을 알 수 있다. 이때,  $p=0.95$ 에 대응하는 전자량( $N_c$ )은 대략  $1.7 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ 인 것이 실험적으로 관측되었으며, 이 실험 결과는 "Y. Tokura, Y. Taguchi, Y. Okada, Y. Fujishima, T. Arima, K. Kumagai, and Y. Iye, Phys. Rev. Lett. 70, 2126(1993)" 및 "K. Kumagai, T. Suzuki, Y. Taguchi, Y. Okada, Y. Fujishima, and Y. Tokura, Phys. Rev. B48, 7636(1993)"에 잘 나타나 있다. 한편  $p=0.95$  이하, 즉  $\text{La}^{+3}$ 의 전자 첨가량이 줄거나, 또는  $\text{Sr}^{+2}$ 의 홀 첨가량이 5% 이상으로 증가되는 경우에는, 캐리어의 감소로 인한 연속적인 금속-절연체 상전이(continuous metal-insulator transition) 현상이 발생된다.

도 3은  $\text{LaTiO}_3$  (LTO) 모트 절연체에 첨가되는  $\text{Sr}^{+2}$  홀의 비율, 즉 전도띠 채우기 인자값( $p$ )에 따른 전기 전도도( $\sigma$ )를 나타내 보인 그래프이다. 도 3에서  $\sigma_{\text{BR}}$ 는 금속상에서의 임계 전기 전도도를 나타낸다.

도 3에 도시된 바와 같이,  $k=1$ 인 경우,  $p=1$ 에서부터  $p=0.95$ 에 이르기까지, 즉  $\text{LaTiO}_3$  (LTO) 모트 절연체에  $\text{Sr}^{+2}$  5%의 홀이 첨가되기까지, 전기 전도도가 급격하게 증가되어  $p=0.95$ 에서 최대 전기 전도도가 얻어진다는 것이 실험적으로 관측되었으며, 이 실험 결과는 앞서 인용한 "Y. Tokura, Y. Taguchi, Y. Okada, Y. Fujishima, T. Arima, K. Kumagai, and Y. Iye, Phys. Rev. Lett. 70, 2126(1993)" 및 "K. Kumagai, T. Suzuki, Y. Taguchi, Y. Okada, Y. Fujishima, and Y. Tokura, Phys. Rev. B48, 7636(1993)"에 잘 나타나 있다.

이와 같은 도 2 및 도 3에 나타난 실험 결과로서,  $\text{SrTiO}_3$  (STO) 모트 절연체에 전자를 첨가하는 것보다  $\text{LaTiO}_3$  (LTO) 모트 절연체에 홀을 첨가하는 것이 보다 효과적으로 최대 전기 전도도를 얻을 수 있다는 결론이 도출된다.

도 4는 이와 같이 급격한 금속-절연체 상전이를 이용한 본 발명에 따른 전계 효과 트랜지스터를 나타내 보인 단면도이다.

도 4를 참조하면,  $\text{SrTiO}_3$  (STO) 기판(400) 위에  $\text{LaTiO}_3$  (LTO) 모트 절연체(410)가 배치된다. 모트 절연체(410)는  $\text{YTiO}_3$  모트 절연체 또는  $\text{h-BaTiO}_3$  모트 절연체일 수도 있다. 모트 절연체(410)의 상부 일부 표면 위에는 게이트 절연막으로서 유전율이 200 이상인 강유전체, 예컨대  $\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3$  (BSTO) 강유전체막(420)이 형성된다. 이  $\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3$  (BSTO) 강유전체막(420)은 일정 전압이 인가됨에 따라 모트 절연체(410)에 충전 홀을 유입시켜 모트 절연체(410)에 급격한 금속-절연체 상전이 현상이 발생되도록 하여 도전 채널(415)이 형성되도록 한다.

상기 강유전체막(420) 위에는 강유전체막(420)에 일정 전압을 인가하기 위한 게이트 전극(430)이 형성된다. 그리고 모트 절연체(410)의 제1 표면 위에는 소스 전극(440)이 형성되고, 모트 절연체(410)의 제2 표면 위에는 드레인 전극(450)이 형성된다. 소스 전극(440)과 드레인 전극(450)은 강유전체막(420)에 의해 상호 이격된다.

이와 같은 전계 효과 트랜지스터의 동작 과정을 설명하면 다음과 같다.

소스 전극(440) 및 드레인 전극(450)에 일정 전압을 인가하여  $\text{LaTiO}_3$  (LTO) 모트 절연체(410) 표면에 일정 포텐셜이 발생되도록 한다. 그리고 게이트 전극(430)에 게이트 전압을 인가하여  $\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3$  (BSTO) 강유전체막(420)으로부터 저농도의  $\text{Sr}^{+2}$  충전 홀이 모트 절연체(410)에 주입되도록 한다. 충전 홀이 주입된  $\text{LaTiO}_3$  (LTO) 모트 절연체(410)는 급격한 금속-절연체 상전이에 의해 도전 채널(415)이 형성되며, 이 도전 채널(415)을 통하여 소스 전극(440)과 드레인 전극(450) 사이에 전류가 흐르게 된다.

충전 홀의 농도가 5%일 때, 즉  $p=0.95$ 일 때, 급격한 금속-절연체 상전이에 의해 만들어지는 금속 영역에서의 전자수는 대략  $4 \times 10^{14} / \text{cm}^2$ 이 되는데, 이 전자수는 일반적인 MOS 전계 효과 트랜지스터의 채널에 존재하는 전자수(대략  $10^{12} / \text{cm}^2$ )의 약 100배 이상이므로 높은 전류 증폭을 얻을 수 있다.

경우에 따라서는 모트 절연체(410)에 충전 전자를 주입시킬 수도 있다. 그러나 충전 홀 대신에 충전 전자를 주입시키는 경우 전력 소모가 증가된다는 단점이 있다. 즉 저농도인  $p = 0.95$ 에 대응하는 정전(static) 홀 전자들의 수( $N_{charge}$ )는, 게이트 전압( $V_g$ )이 0.12Volt, 강유전체막(420)의 유전율( $\epsilon$ )이 200, 그리고 강유전체막(420)의 두께( $d$ )가 50nm인 경우, 대략  $4 \times 10^{14} / \text{cm}^2$ 이 된다( $N_{charge} = V_g \epsilon / ed$ ). 따라서 홀 농도( $N_{hole}$ )를 동일하게 대략  $4 \times 10^{14} / \text{cm}^2$ 로 하고, 다른 변수, 즉 강유전체막(420)의 유전율( $\epsilon$ )과 두께( $d$ )를 트랜지스터 제조 조건에 맞추어 적절한 값으로 조절할 때 게이트 전압( $V_g$ )을 충분히 작게 할 수 있으므로 전력 소모를 감소시킬 수 있다.

그러나 고농도  $p = 0.95$ 에 대응하는 정전 전자들을 모트 절연체(410)에 주입시키는 경우에는 전자들의 수( $N_{electrons}$ )가 홀들의 수( $N_{hole}$ )보다 커서 강유전체막(420)의 유전율( $\epsilon$ )과 두께( $d$ )를 적절히 조절하더라도 홀을 주입하는 경우보다 게이트 전압( $V_g$ )이 커질 수밖에 없다. 따라서 저농도의 홀을 주입하는 경우보다 전력 소모가 더 크다. 본 명세서에서는, 본 발명에 따른 트랜지스터를 모트 혹은 모트 - 허바드(Mott - Hubbard: MH) 전계효과 트랜지스터와 차별화하기 위해 모트 - 브링크만 - 라이스 - 김(Mott - Brinkman - Rice - Kim: MBRK) 트랜지스터라 명명하기로 한다.

#### 발명의 효과

이상의 설명에서와 같이, 본 발명에 따른 전계 효과 트랜지스터는 다음과 같은 효과를 제공한다.

첫째로, 디플리션층이 존재하지 않으므로 채널 길이에 따른 제한이 없어서 소자의 집적도 및 스위칭 속도를 크게 향상시킬 수 있다.

둘째로, 게이트 절연막으로서 적절히 높은 유전율의 강유전체막을 사용하므로 두께를 크게 줄이지 않고도 저전압에서 적절한 도핑용 홀을 얻을 수 있다.

그리고 셋째로, 저농도의 홀을 모트 절연체에 주입시켜 급격한 모트 - 절연체 상전이를 유발시키므로 높은 전류 이득과 낮은 전력 소모를 얻을 수 있다.

#### (57) 청구의 범위

##### 청구항 1.

기판;

상기 기판 상에 배치되어 충전 홀이 유입시 급격한 금속 - 절연체 상전이를 발생시키는 모트 절연체;

상기 모트 절연체 위에 배치되어 일정 전압 인가시 상기 충전 홀을 상기 모트 절연체에 유입시키는 강유전체막;

상기 강유전체막 위에 배치되어 상기 강유전체막에 일정 전압을 인가하기 위한 게이트 전극;

상기 모트 절연체의 제1 표면과 전기적으로 연결되도록 형성된 소스 전극; 및

상기 모트 절연체의 제2 표면과 전기적으로 연결되도록 형성된 드레인 전극을 구비하는 것을 특징으로 하는 전계 효과 트랜지스터.

##### 청구항 2.

제1항에 있어서,

상기 기판은  $\text{SrTiO}_3$  기판인 것을 특징으로 하는 전계 효과 트랜지스터.

##### 청구항 3.

제1항에 있어서,

상기 모트 절연체는,  $\text{LaTiO}_3$ ,  $\text{YTiO}_3$  또는  $\text{h-BaTiO}_3$  물질로 이루어진 것을 특징으로 하는 전계 효과 트랜지스터.

청구항 4.

제1항에 있어서,

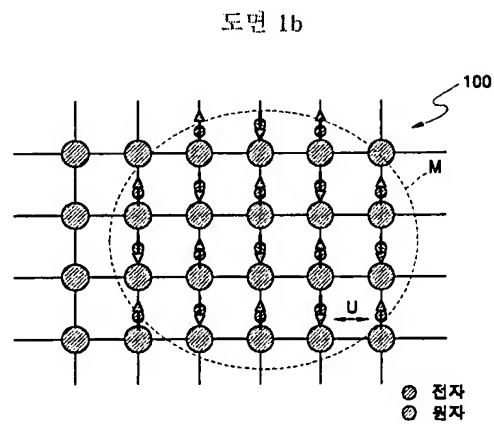
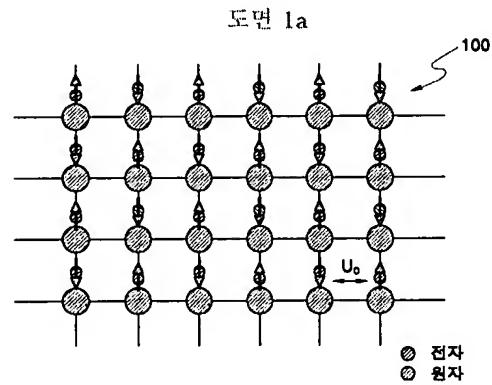
상기 강유전체막은  $\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3$  물질로 이루어진 것을 특징으로 하는 전계 효과 트랜지스터.

청구항 5.

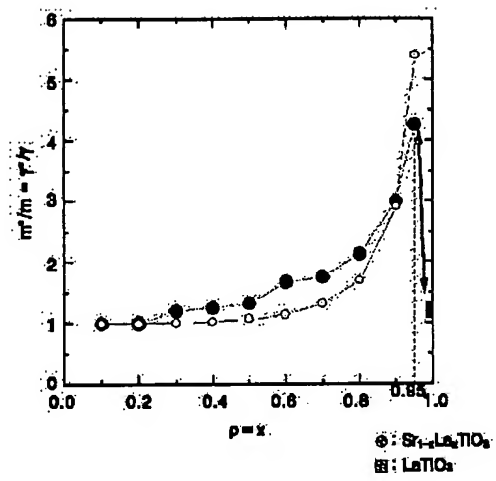
제1항에 있어서,

상기 소스 전극과 상기 드레인 전극은 상기 강유전체막에 의해 상호 분리되는 것을 특징으로 하는 전계 효과 트랜지스터.

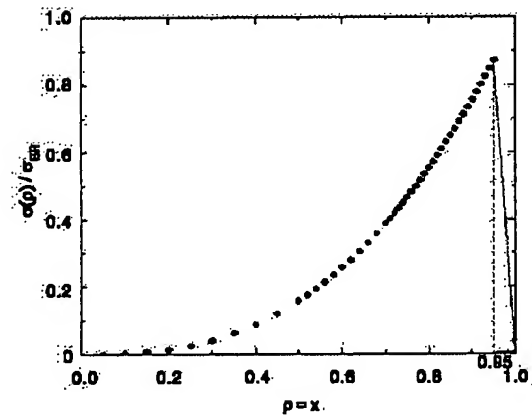
도면



도면 2



도면 3





도면 4

